

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

OH-681A

Prior Art 1

(11)Publication number : 2000-066253

(43)Date of publication of application : 03.03.2000

(51)Int.Cl.

G02F 1/35

(21)Application number : 10-233070

(71)Applicant : FUJITSU LTD

(22)Date of filing : 19.08.1998

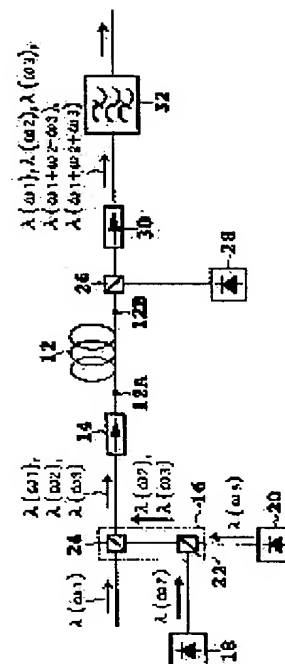
(72)Inventor : SUKUNAMI NOBUFUMI
KINOSHITA SUSUMU
HASHI TOSHIO

(54) METHOD AND DEVICE FOR CONVERTING WAVELENGTH

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a wavelength conversion method high in conversion efficiency by including a step to output converted light signals, from an optical waveguide structure, which are produced by four-wave mixing based on light signals and one pumping light beam and which has different wavelength from the wavelength of the light signals.

SOLUTION: Light signals amplified in an erbium dope fiber(EDF) 12, and first and second pumping light beams are supplied through a wavelength dividing multiple(WDM) coupler 26 and optical isolator 30 in this order to an optical band pass filter 32. The converted light signals produced in FWM of EDF 12 are also supplied through the WDM coupler 26 and optical isolator 30 to the optical band pass filter 32. The converted light signals produced in FWM of EDF 12 are also supplied through the WDM coupler 26 and optical isolator 30 to the optical band pass filter 32. The optical band pass filter 32 has a band pass region including the wavelength of converted light signals but not including the light signals and wavelengths of the first and second pumping light beams. The converted light signals are extracted by the optical band pass filter 32 and outputted from the device.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-66253

(P2000-66253A)

(43) 公開日 平成12年3月3日(2000.3.3)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テマコード (参考)

G 0 2 F 1/35

G 0 2 F 1/35

2 K 0 0 2

審査請求 未請求 請求項の数31 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願平10-233070

(22) 出願日 平成10年8月19日(1998.8.19)

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72) 発明者 宿南 宣文

北海道札幌市中央区北一条西2丁目1番地
富士通北海道デジタル・テクノロジー株
式会社内

(72) 発明者 木下 進

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 100075384

弁理士 松本 昂

最終頁に続く

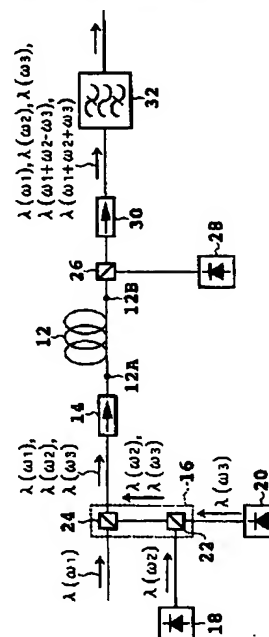
(54) 【発明の名称】 波長変換のための方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 本発明は波長変換のための方法及び装置に関し、変換効率の高い方法及び装置の提供を課題としている。

【解決手段】 本発明による方法では、まず、希土類化合物（例えばエルビウム化合物）がドープされた光導波構造（例えばエルビウムドープファイバ）が提供される。次いで、光導波構造が利得帯域を提供するように光導波構造がポンピングされる。そして、光信号及び少なくとも1つのポンプ光ビームが光導波構造に入力される。光導波構造内における光信号及び少なくとも1つのポンプ光ビームに基づく四光波混合により、光信号の波長と異なる波長を有する変換光信号が発生し、変換光信号は光導波構造から出力される。この方法では、光信号及び少なくとも1つのポンプ光ビームが光導波構造において増幅され得るので、光信号から変換光信号への変換効率を高めることができる。

本発明による装置の第1実施形態を示すブロック図



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 波長変換のための方法であって、

(a) 希土類化合物がドープされた光導波構造を提供するステップと、

(b) 上記光導波構造が利得帯域を提供するように上記光導波構造をポンピングするステップと、

(c) 上記光導波構造に光信号及び少なくとも 1 つのポンプ光ビームを入力するステップと、

(d) 上記光導波構造内における上記光信号及び上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームに基づく四光波混合により発生した、上記光信号の波長と異なる波長を有する変換光信号を上記光導波構造から出力するステップとを備えた方法。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の方法であって、上記光信号は伝送信号により変調されており、それにより上記変換光信号も上記伝送信号により変調されている方法。

【請求項 3】 請求項 1 に記載の方法であって、上記光導波構造は光ファイバである方法。

【請求項 4】 請求項 1 に記載の方法であって、上記光導波構造はエルビウムドープファイバである方法。

【請求項 5】 請求項 1 に記載の方法であって、上記ステップ (b) は上記光導波構造にポンピングのための光を供給するステップを含む方法。

【請求項 6】 請求項 5 に記載の方法であって、上記光導波構造はエルビウムドープファイバであり、上記ポンピングのための光は $0.98\mu\text{m}$ 帯又は $1.48\mu\text{m}$ 帯に含まれる波長を有しており、上記利得帯域は $1.55\mu\text{m}$ を含む方法。

【請求項 7】 請求項 1 に記載の方法であって、上記光信号及び上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームの各々は上記利得帯域に含まれる波長を有している方法。

【請求項 8】 請求項 1 に記載の方法であって、上記光導波構造はグレーティングを有しており、上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームは上記グレーティングにおける発振により生じる光を含む方法。

【請求項 9】 請求項 1 に記載の方法であって、上記ポンプ光ビームの波長を変化させるステップを更に備えた方法。

【請求項 10】 波長変換のための装置であって、希土類化合物がドープされたドープファイバと、上記ドープファイバが利得帯域を提供するように上記ドープファイバをポンピングする第 1 の手段と、上記ドープファイバに光信号及び少なくとも 1 つのポンプ光ビームを供給するための第 2 の手段とを備え、上記ドープファイバ内における上記光信号及び上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームに基づく四光波混合により上記光信号の波長と異なる波長を有する変換光信号が発生する装置。

【請求項 11】 請求項 10 に記載の装置であって、

上記ドープファイバは第 1 端及び第 2 端を有し、

上記第 1 の手段は上記第 1 端及び第 2 端の少なくともいずれか一方からポンピングのための光を上記ドープファイバに供給するための光源を含み、

上記光信号は上記第 1 端から上記ドープファイバに供給され、

上記変換光信号は上記第 2 端から出力される装置。

【請求項 12】 請求項 11 に記載の装置であって、上記第 2 の手段は上記ドープファイバの第 1 端に光学的に接続される光マルチプレクサを含み、

上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームは第 1 及び第 2 のビームを含み、該第 1 及び第 2 のビーム並びに上記光信号は上記光マルチプレクサにより合波されて上記第 1 端から上記ドープファイバに供給される装置。

【請求項 13】 請求項 11 に記載の装置であって、上記第 2 の手段は、上記ドープファイバの第 1 端に光学的に接続される光マルチプレクサと、上記ドープファイバに形成されたファイバグレーティングとを含み、上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームは、上記光マルチプレクサにより上記光信号と合波されるべき第 1 のビームと、上記ファイバグレーティングにおける発振により生じる第 2 のビームとを含む装置。

【請求項 14】 請求項 11 に記載の装置であって、上記第 2 の手段は上記ドープファイバに形成された第 1 及び第 2 のファイバグレーティングを含み、上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームは、上記第 1 及び第 2 のファイバグレーティングにおいてそれぞれ発振により生じる第 1 及び第 2 のビームを含む装置。

【請求項 15】 請求項 11 に記載の装置であって、上記第 2 の手段は、上記ドープファイバの第 1 端及び第 2 端にそれぞれ光学的に接続される第 1 及び第 2 のファイバグレーティングと、上記第 1 のファイバグレーティングに光学的に接続される光マルチプレクサとを含み、上記少なくとも 1 つのポンプ光ビームは、上記光マルチプレクサにより上記光信号と合波されるべき第 1 のビームと、上記第 1 及び第 2 のファイバグレーティング間における発振により生じる第 2 のビームとを含む装置。

【請求項 16】 請求項 10 に記載の装置であって、上記ドープファイバに光学的に接続され上記変換光信号を取り出すための光フィルタを更に備えた装置。

【請求項 17】 請求項 10 に記載の装置であって、上記ドープファイバに光学的に接続される光アイソレータを更に備えた装置。

【請求項 18】 請求項 10 に記載の装置であって、上記ドープファイバはエルビウムドープファイバであり、上記第 1 の手段は $0.98\mu\text{m}$ 帯又は $1.48\mu\text{m}$ 帯に含まれる波長を有する光を上記エルビウムドープファイバに供給するための光源を含み、

上記利得帯域は1. 55 μm を含む装置。

【請求項19】 請求項10に記載の装置であって、上記ドープファイバが挿入固定されるフェルルを更に備えた装置。

【請求項20】 請求項19に記載の装置であって、上記フェルルは上記ドープファイバの軸に垂直な面に対して傾斜した端面を有している装置。

【請求項21】 請求項19に記載の装置であって、上記フェルルの端面に形成された反射防止膜を更に備えた装置。

【請求項22】 請求項10に記載の装置であって、上記ドープファイバはフッ化物ファイバにより提供される装置。

【請求項23】 請求項22に記載の装置であって、上記希土類化合物の濃度は50, 000 ppm以上である装置。

【請求項24】 請求項10に記載の装置であって、上記ドープファイバは偏波保持ファイバにより提供され、該偏波保持ファイバは上記光信号及び上記少なくとも1つのポンプ光ビームの偏波面を実質的に平行にする装置。

【請求項25】 請求項10に記載の装置であって、上記ドープファイバに光学的に接続される非線形光学媒質を更に備えた装置。

【請求項26】 請求項25に記載の装置であって、上記非線形光学媒質は光ファイバである装置。

【請求項27】 請求項26に記載の装置であって、上記光ファイバは上記変換光信号に $\pm 5 \text{ ps/nm/km}$ の範囲の波長分散を与える装置。

【請求項28】 請求項26に記載の装置であって、上記ドープファイバ及び上記光ファイバの各々は偏波保持ファイバにより提供され、該偏波保持ファイバは上記光信号及び上記少なくとも1つのポンプ光ビームの偏波面を実質的に平行にする装置。

【請求項29】 請求項10に記載の装置であって、上記少なくとも1つのポンプ光ビームはファイバグレーティングにおける発振により生じる光を含み、上記ファイバグレーティングのグレーティングピッチを変化させる手段を更に備えた装置。

【請求項30】 請求項10に記載の装置であって、上記第2の手段は上記ドープファイバの第1端及び第2端にそれぞれ光学的に接続される第1及び第2の反射器を含み、上記少なくとも1つのポンプ光ビームは上記第1及び第2の反射器間における発振により生じる光を含む装置。

【請求項31】 請求項30に記載の装置であって、上記第1及び第2の反射器の各々は可変の波長選択性を有している装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は波長変換のための方法及び装置に関する。光ファイバによる伝送容量を増大させるための技術として、波長分割多重(WDM)がある。WDMが適用されるシステムにおいては、異なる波長を有する複数の光キャリアが用いられる。各光キャリアを独立に変調することによって得られた複数の光信号が光マルチプレクサにより波長分割多重され、その結果得られたWDM信号光が光ファイバ伝送路へ送出される。受信側では、受けたWDM信号光が光デマルチプレクサによって個々の光信号に分離され、各光信号に基づいて伝送データが再生される。従って、WDMを適用することによって、多重数に応じて1本の光ファイバによる伝送容量を増大させることができる。

【0002】このように、WDM伝送システムは、伝送容量を飛躍的に増大させることができる通信システムとして、開発及び実用化が進められている。しかし、2つのノード間のトラヒックは、ノード間に大容量伝送路を導入して見合うほど十分にある場合は少ない。従って、大容量の伝送システムを効率的に使用するためには、その大容量伝送路にできるだけ低コストでアクセスする機能及び編集する機能が必要となる。

【0003】WDMを適用することにより、単に伝送容量を増大させるだけでなく、各ノードにおいて波長による識別及びルーチングを行うことで、各ノードにおいてアクセスする機能及び編集する機能を容易に実現することができる。こうしたことから、WDMと波長ルーチングとを組み合わせた光波ネットワークは、次期幹線系的主力システムと位置付けられている。波長変換のための方法及び装置は、こういった光波ネットワークを実現する上でのキーテクノロジーとなる。

【0004】

【従来の技術】従来知られているのは、四光波混合(FWM)を利用した波長変換のための方法である。FWMは光の3次の非線形現象である。光が光学媒質に入射すると、その光は、入射電界Eによって誘起される光学媒質中の分極密度Pとの相互関係に従って伝搬する。一般に、電界Eと分極密度Pの関係は次式で表される。

【0005】

$$P = \epsilon_0 \chi E + 2 d E^2 + 4 \chi^{(3)} E^3 + \dots$$
第1項は線形性を示す項であり、比較的弱い電場のもとでは分極密度は電場に比例することを示している。電場(光のパワー)が強くなれば、第2項以降を無視することができなくなり、ほとんどの光学媒質は非線形応答を示すようになる。第2項は2次の非線形効果を示す項であり、石英(SiO_2)のように等方的媒質であればこれを無視することができる。

【0006】3次の非線形効果を示す媒質に周波数が ω_1 、 ω_2 、 ω_3 の3つの光を入射すると、
$$E(\omega) = E_1 \exp(i\omega_1 t) + E_2 \exp(i\omega_2 t) +$$

$$E_3 \exp(i\omega_3 t)$$

で表され、3次の非線形分極密度 $p = 4\chi^{(3)} E^3$ は、 $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ 及び $(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$ という新しい周波数を含むことになる。この光の周波数を ω_4 とすると、

$$\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$$

$$\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$$

が成り立つところに新しい光が生じる。波長変換は以上のような原理で行われている。

【0007】図1の(A)及び(B)は波長変換のための従来の2つの方法を説明するための図である。第1の方法は非線形光学媒質として図1の(A)に示されるような半導体光増幅器2を用いる方法である。半導体光増幅器2は光を導波するための活性層4を有している。

【0008】周波数 ω_S の信号光と周波数 ω_P のポンプ光とが半導体光増幅器2に入力すると、信号光及びポンプ光の他に、周波数 $(2\omega_P - \omega_S)$ の位相共役光が半導体光増幅器2から出力される。このように信号光から位相共役光への波長変換がなされており、信号光及び／又はポンプ光について変調が行われている場合には、その変調は位相共役光にも反映される。

【0009】第2の方法は図1の(B)に示されるようなDFBレーザ6を用いる方法である。DFBレーザ6は、光を導波するための活性層8と、活性層8に沿って形成される波状の回折格子10とを有している。回折格子10は屈折率分布によって提供され得る。

【0010】DFBレーザ6においては、発振によりポンプ光が発生しているため、信号光をDFBレーザ6に入力するだけで位相共役光が得られる。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】図1の(A)及び(B)により説明した従来の波長変換のための方法では、波長変換における変換効率が低いという問題があった。

【0012】また、半導体光増幅器2及びDFBレーザ6の各々を光ファイバと光学的に接続するためにはレンズ等を用いた高精度な位置調整が必要であり、接続損失を小さく抑えた上での光ファイバとの接続が容易でないという問題があった。

【0013】更に、特に図1の(A)に示される半導体光増幅器2を用いた波長変換のための方法では、信号光から位相共役光に波長変換するためにポンプ光を出力する光源が必要になり、装置構成が複雑になるという問題もあった。

【0014】よって、本発明の目的は、変換効率の高い波長変換のための方法又は装置を提供することである。本発明の他の目的は、光ファイバとの接続が容易な波長変換のための装置を提供することである。

【0015】本発明の更に他の目的は、構成が簡単な波長変換のための装置を提供することである。

【0016】

【課題を解決するための手段】本発明によると、波長変換のための方法であって、(a)希土類化合物がドープされた光導波構造を提供するステップと、(b)上記光導波構造が利得帯域を提供するように上記光導波構造をポンピングするステップと、(c)上記光導波構造に光信号及び少なくとも1つのポンプ光ビームを入力するステップと、(d)上記光導波構造内における上記光信号及び上記少なくとも1つのポンプ光ビームに基づく四光波混合により発生した、上記光信号の波長と異なる波長を有する変換光信号を上記光導波構造から出力するステップとを備えた方法が提供される。

【0017】この方法では、例えば、光信号及び少なくとも1つのポンプ光ビームの各々が、光導波構造によって提供される利得帯域に含まれる波長を有している場合に、光信号及び少なくとも1つのポンプ光ビームのパワーが高まり、非線形効果が効率的に生じやすくなるので、光信号から変換光信号への波長変換における変換効率が高まる。

【0018】望ましくは、光導波構造は、ファイバグレーティングが形成された光ファイバである。この場合、少なくとも1つのポンプ光ビームは、ファイバグレーティングにおける発振により生じる光を含むことができるので、簡単な装置により波長変換を行うことができる。

【0019】特に、ファイバグレーティングのグレーティングピッチを変化させる手段を付加的に用いることによって、ファイバグレーティングにおける発振により得られるポンプ光ビームの波長を変化させることができるので、光信号の波長とポンプ光ビームの波長との関係によって決定される変換光信号の波長を調節し得ようになる。ファイバグレーティングのグレーティングピッチは、例えば、ファイバグレーティングの温度を変化させることによって変化させることができる。

【0020】このように、ポンプ光ビームの波長を変化させることによって、光信号及び変換光信号間の離調波長を調節し得ようになる。本発明の他の側面によると、波長変換のための装置であって、希土類化合物がドープされたドープファイバと、上記ドープファイバが利得帯域を提供するように上記ドープファイバをポンピングする第1の手段と、上記ドープファイバに光信号及び少なくとも1つのポンプ光ビームを供給するための第2の手段とを備え、上記ドープファイバ内における上記光信号及び上記少なくとも1つのポンプ光ビームに基づく四光波混合により上記光信号の波長と異なる波長を有する変換光信号が発生する装置が提供される。

【0021】

【発明の実施の形態】以下本発明の望ましい実施の形態を詳細に説明する。まず、図2及び図3により、エルビウムドープファイバ(EDF)における四光波混合(FWM)の発生を確認した実験について説明する。図2は

用いられた実験系を示すブロック図、図3はFWMにより生じた光のスペクトルを示す図である。

【0022】8台のレーザダイオードにより双方向ポンピングされているEDFの一端に波長分割多重光(WDM光)が供給され、EDFの他端から出力された光がスペクトルアナライザに供給された。

【0023】WDM光は、16台のレーザダイオードから出力された光信号を各々アッテネータ(ATT)によりパワー調節した後、アレイ導波路グレーティング(AWG)により合波することによって得られた。光信号の波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_{16}$ は波長軸上で実質的に等間隔に設定され、具体的には、1535.8nm, 1537.4nm, 1538.9nm, \dots , 1560.1nmであった。

【0024】フォワードポンピング用及びバックワードポンピング用の各々4台のレーザダイオードは、1460nm帯の2台のレーザダイオードと、1490nm帯の2台のレーザダイオードとによって提供された。

【0025】図3において、ASEで示されているのは、増幅された自然放出光(ASE)のなだらかなスペクトルであり、1533nm付近及び1558nm付近に2つのピークを有している。

【0026】このASEスペクトルに符号WDMで示されるように16チャンネルのWDM光の鋭いスペクトルが重畳されている。また、FWMで示されているのは、1535nm付近に生じた小さなスペクトルであり、これがEDFにおけるFWMによって生じたものである。

【0027】図4は本発明による波長変換のための方法の第1実施形態を説明するための図である。ここでは、希土類化合物がドープされた光導波構造は、第1端12A及び第2端12Bを有するエルビウムドープファイバ(EDF)12によって提供されている。

【0028】EDF12は、EDF12が利得帯域を提供するようにポンピングされる。EDF12のポンピングは、例えば、0.98 μ m帯(0.96-1.00 μ m)あるいは1.48 μ m帯(1.46-1.50 μ m)のポンピングのための光を第1端12A及び第2端12Bの少なくともいずれか一方からEDF12に供給することによって行うことができる。

【0029】以下、このポンピングのための光をFWMのためのポンプ光ビームと区別するために「ポンピング光」と称する。EDF12は、例えば、シングルモードシリカファイバのコアにエルビウム化合物をドープすることにより製造することができる。

【0030】ポンピング光の波長を0.98 μ m帯及び/又は1.48 μ m帯に設定することによって、1.55 μ mを含む利得帯域が得られる。1.55 μ m帯におけるシリカファイバの損失は小さいので、この利得帯域はシリカファイバを光ファイバ伝送路として用いる場合に適している。

【0031】EDF12には、第1端12Aから、波長 $\lambda(\omega_1)$ の光信号と、波長 $\lambda(\omega_2)$ の第1のポンプ光ビームと、波長 $\lambda(\omega_3)$ の第2のポンプ光ビームとが入力される。

【0032】 $\lambda(\omega)$ という表記は、周波数(角周波数) ω に対応する波長を表すものとして用いられている。EDF12内における光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームに基づくFWMにより、変換光信号が発生する。変換光信号の波長は $\lambda(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$ 又は $\lambda(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ である。

【0033】尚、 $\omega_1 = \omega_2$ である場合には、変換光信号の波長は $\lambda(2\omega_1 - \omega_3)$ 又は $\lambda(2\omega_1 + \omega_3)$ である。また、 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ である場合には、変換光信号の波長は $\lambda(3\omega_1)$ である。

【0034】光信号は伝送信号により変調されていてもよい。この場合、FWMによる波長変換の原理上、変換光信号も伝送信号により変調されているので、本発明方法を適用することにより波長ルーチングが可能になる。

【0035】本発明は、光信号の波長と変換光信号の波長とが異なることのみによって限定される。従って、各ポンプ光ビームの波長は任意である。望ましくは、光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームの各々は、EDF12によって提供される利得帯域に含まれる波長を有している。この場合、EDF12に投入した光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームはEDF12内で増幅されるので、前述した分極密度Pにおける電界Eに関する3次の項を相対的に大きくすることができるので、FWMが効果的に発生し、光信号から変換光信号への変換効率を高めることができる。

【0036】ポンピング光はEDF12にその第1端12Aから供給してもよいし、第2端12Bから供給してもよいし、あるいは第1端12A及び第2端12Bの双方から供給してもよい。ポンピング光が第1端12AからEDF12に供給される場合には、EDF12内におけるポンピング光と光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームとが同じ向きに伝搬するのでフォワードポンピングとなり、ポンピング光が第2端12BからEDF12に供給される場合には、ポンピング光と光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームとが逆向きに伝搬するのでバックワードポンピングとなり、ポンピング光が第1端12A及び第2端12Bの両方からEDF12に供給される場合には双方向ポンピングとなる。

【0037】EDF12は偏波保持ファイバ(PMF)により提供されてもよい。この場合EDF12内において光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームの偏波面を実質的に平行にする(一致させる)ことができるので、FWMを効果的に発生させ、光信号から変換光信号への変換効率を更に高めることができる。

【0038】図5は本発明による波長変換のための方法の第2実施形態を説明するための図である。ここでは、

EDF 12の一部又は全部にファイバグレーティングFGが形成されている。FGが形成されているEDF 12がポンピングされると、ファイバグレーティングFGにおいてそのグレーティングピッチにより決定される波長でレーザ発振が生じ、それにより得られた光が第2のポンプ光ビームとして用いられている。即ち、EDF 12において生じたASEのうち波長 λ (ω_3)の成分の強度がレーザ発振により著しく高くなり、波長 λ (ω_3)の第2のポンプ光ビームが得られるものである。

【0039】この実施形態では、波長 λ (ω_1)の光信号と波長 λ (ω_2)の第1のポンプ光ビームとが第1端12AからEDF 12に供給され、第2のポンプ光ビームは第1端12AからはEDF 12には供給されない。にもかかわらず、ファイバグレーティングFGにおけるレーザ発振により第2のポンプ光ビームが得られるので、EDF 12内においては、光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームに基づきWFMが発生し、光信号は変換光信号に変換される。変換光信号の波長は、第1実施形態におけるのと同様に、 λ ($\omega_1 + \omega_2 - \omega_3$)又は λ ($\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$)である。特に、 $\omega_1 = \omega_2$ である場合には、変換光信号の波長は、 λ ($2\omega_1 - \omega_3$)又は λ ($2\omega_1 + \omega_3$)である。

【0040】このように、第2実施形態では、EDF 12に外部から第2のポンプ光ビームを供給する必要がないので、この方法の実施に使用する装置の構成を簡単にすることができる。

【0041】図6は本発明による波長変換のための方法の第3実施形態を説明するための図である。ここでは、EDF 12に2つのファイバグレーティングFG (#1及び#2)が形成されている。ファイバグレーティングFG (#1)におけるレーザ発振により波長 λ (ω_2)の第1のポンプ光ビームが得られ、ファイバグレーティングFG (#2)におけるレーザ発振により波長 λ (ω_3)の第2のポンプ光ビームが得られている。

【0042】従って、波長 λ (ω_1)の光信号だけをEDF 12にその第1端12Aから供給することによってFWMが発生し、光信号は変換光信号に変換される。変換光信号の波長は λ ($\omega_1 + \omega_2 - \omega_3$)又は λ ($\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$)である。

【0043】このように、第3実施形態によると、第1及び第2のポンプ光ビームを外部からEDF 12に供給する必要がないので、この方法の実施に使用する装置の構成を簡単にすることができる。

【0044】図7は本発明による波長変換のための装置の第1実施形態を示すブロック図である。この装置は例えば図4により説明した方法を実施するために使用することができる。

【0045】EDF 12の第1端12Aは光アイソレータ14の出力ポートに光学的に接続され、光アイソレータ14の入力ポートは光マルチプレクサ16に光学的に

接続されている。

【0046】光マルチプレクサ16は、第1及び第2のポンプ光ビームをそれぞれ出力するレーザダイオード18及び20に接続されるWDMカブラ22と、WDMカブラ22に接続されるもう1つのWDMカブラ24とを含む。

【0047】第1及び第2のポンプ光ビームはWDMカブラ22により合波され、合波された第1及び第2のポンプ光ビームはWDMカブラ24により光信号と合波され、合波された光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームは光アイソレータ14を通してEDF 12に供給される。

【0048】EDF 12をポンピングするために、EDF 12の第2端12Bには、WDMカブラ26を介して、ポンピング光を出力するレーザダイオード28が接続されている。レーザダイオード28から出力されたポンピング光は、WDMカブラ26を通してEDF 12にその第2端12Bから供給される。従って、EDF 12のバックワードポンピングにより、EDF 12は利得帯域を提供する。

【0049】EDF 12内において増幅された光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームは、WDMカブラ26及び光アイソレータ30をこの順に通って光帯域通過フィルタ32に供給される。また、EDF 12内におけるFWMにより発生した変換光信号もWDMカブラ26及び光アイソレータ30をこの順に通って光帯域通過フィルタ32に供給される。

【0050】光帯域通過フィルタ32は、望ましくは、変換光信号の波長を含み且つ光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームの波長を含まない通過帯域を有しており、これにより変換光信号が光帯域通過フィルタ32により抽出されてこの装置から出力される。

【0051】光信号及び変換光信号が伝送信号により変調されている場合、第1及び第2のポンプ光ビームは雑音成分となるので、光帯域通過フィルタ32を用いることによって、SNR (信号対雑音比)を良好にすることができる。

【0052】変換光信号を取り出すためのものであれば、光帯域阻止フィルタその他の光フィルタを光帯域通過フィルタ32に代えて用いてもよい。尚、この実施形態において、光アイソレータ14及び30を用いているのは、利得帯域を提供しているEDF 12を含む光共振器構造が構成されて不所望な発振動作等が生じることを防止するためである。

【0053】光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームの波長がEDF 12によって提供される利得帯域に含まれる場合、FWMを効果的に発生させることができるので、光信号から変換光信号への変換効率が高い装置の提供が可能になる。また、希土類化合物がドーピングされた光導波構造としてEDF 12を用いており、EDF 12

は周辺部品とのスプライシング等による接続が容易であるので、この装置の製造あるいはこの装置が適用されるシステムの構築を容易に行うことができる。

【0054】図8は本発明による波長変換のための装置の第2実施形態を示すブロック図である。この装置は例えば図5により説明した方法を実施するために使用することができる。

【0055】全図を通して実質的に同一の部分には同一の符号が付けられている。この実施形態では、波長 λ (ω_3)の第2のポンプ光をレーザ発振により得るためのファイバグレーティングFGがEDF12に形成されている。その結果、図7に示される第2のポンプ光のためのレーザダイオード20が不要になると共に光マルチプレクサ16'の構成が簡単になる。

【0056】具体的には、光マルチプレクサ16'は、レーザダイオード18から出力された波長 λ (ω_2)の第1のポンプ光ビームと波長 λ (ω_1)の光信号とを合波するためのWDMカブラ24によって提供されており、WDMカブラ24によって合波された光信号及び第1のポンプ光ビームは光アイソレータ14を通過してEDF12に供給される。

【0057】この実施形態によると、図7に示される第1実施形態により得られる効果に加えて、レーザダイオード20が不要になると共に光マルチプレクサ16'の構成が簡単になる分だけ装置が簡単になるという効果が生じる。

【0058】図9は本発明による波長変換のための装置の第3実施形態を示すブロック図である。この装置は図6により説明した方法の実施に使用することができる。これまでに説明した実施形態の各々で用いていたEDF12は2つのEDF12 (#1及び#2)に分割され、これらの間に光アイソレータ34が設けられている。EDF12 (#1及び#2)にはそれぞれファイバグレーティングFG (#1及び#2)が形成されている。

【0059】レーザダイオード28から出力されたポンピング光は、WDMカブラ26を通過してEDF12 (#2)には供給されるが、EDF12 (#2)を通過したポンピング光は光アイソレータ34により遮断されてEDF12 (#1)には供給されない。そこで、EDF12 (#1)は、WDMカブラ36を介して、EDF12 (#1)のためのポンピング光を出力するレーザダイオード38に接続されている。

【0060】レーザダイオード38から出力されたポンピング光は、光アイソレータ40を通過した波長 λ (ω_1)の光信号とWDMカブラ36により合波され、合波された光信号及びポンピング光はEDF12 (#1及び#2)に供給される。

【0061】ファイバグレーティングFG (#1)においては、レーザ発振により波長 λ (ω_2)の第1のポンプ光ビームが発生し、ファイバグレーティングFG (#

2)においては、レーザ発振により波長 λ (ω_3)の第2のポンプ光ビームが発生する。

【0062】EDF12 (#1及び#2)内で増幅された光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームは、WDMカブラ26及び光アイソレータ30をこの順に通過して光帯域通過フィルタ32に供給される。また、EDF12 (#1及び#2)内においてFWMにより発生した変換光信号もWDMカブラ26及び光アイソレータ30をこの順に通過して光帯域通過フィルタ32に供給される。

【0063】そして、光帯域通過フィルタ32により抽出された変換光信号がこの装置から出力される。この実施形態によると、図7に示される第1実施形態により得られる効果に加えて、図7に示されるレーザダイオード18及び20並びに光マルチプレクサ16が不要になり、装置の構成が簡単になるという効果が生じる。

【0064】図10は本発明による波長変換のための装置の第4実施形態を示すブロック図である。図8に示される実施形態においては、EDF12に形成されたファイバグレーティングFGにおける分布帰還 (DFB: Distributed Feed-back)により波長 λ (ω_3)の第2のポンプ光ビームが発生しているのに対して、図10に示される第4実施形態では、EDF12に分布ブラッグ反射 (DBR: Distributed Bragg Reflection) を適用することにより、波長 λ (ω_3)の第2のポンプ光ビームを発生させている。

【0065】そのために、この実施形態では、EDF12の第1端12Aと光アイソレータ14の出力ポートとの間にはファイバグレーティング42が接続されており、EDF12の第2端12BとWDMカブラ26との間にはファイバグレーティング44が接続されている。

【0066】ファイバグレーティング42及び44の各々のブラッグ反射波長は λ (ω_3)である。この実施形態によると、EDF12の両側に2つの反射器 (ファイバグレーティング42及び44) が設けられた光共振器構造が得られるので、EDF12におけるレーザ発振により第2のポンプ光ビームが発生し、図8に示される実施形態におけるのと同様の効果が得られる。

【0067】図10に示されるファイバグレーティング42及び44に代えて、EDF12の両側に設けられる2つの反射器として、例えば誘電体多層膜を用いて構成される光学フィルタを用いることもできる。各反射器は波長選択性を有しており、反射器間における発振により例えば第2のポンプ光ビームを発生させることができる。従って、各反射器の波長選択性を可変にしておくことによって、光信号及び変換光信号間の離調波長を調節し得るようになる。各反射器の波長選択性は、例えば、光学フィルタへの入射角を変化させることにより調節することができる。あるいは、光学フィルタの誘電体多層膜の厚みに分布を持たせておき、その誘電体多層膜を光路と平行でない方向、例えば光路と実質的に垂直な方向

に変位させることによって、各反射器の波長選択性を変化させることができる。

【0068】図11は本発明による波長変換のための装置の第5実施形態を示すブロック図である。ここでは、光アイソレータ46とWDMカブラ48との間をEDF50により接続し、EDF50をポンピングするためにレーザダイオード52をWDMカブラ48に接続している。レーザダイオード52から出力されたポンピング光はWDMカブラ48を通過してEDF50に供給される。EDF50にはファイバグレーティングFGが形成されており、ファイバグレーティングFGにおける分布帰還によってレーザ発振が生じ、EDF50内で波長 λ (ω_2) の第1のポンプ光ビームが発生する。

【0069】波長 λ (ω_1) の光信号は光アイソレータ46を通過してEDF50に供給される。EDF50の長さはEDF50内においてFWMが生じない程度に短く設定されている。

【0070】光信号及び第1のポンプ光ビームはEDF50からWDM48及び光アイソレータ14をこの順に通過してファイバグレーティング42に供給される。ファイバグレーティング42及び44並びにEDF12を用いた分布ブラッグ反射により波長 λ (ω_3) の第2のポンプ光ビームが発生する点は、図10に示される実施形態と同様である。

【0071】この実施形態によっても、図10に示される実施形態と同様の効果が得られる。図12は本発明による波長変換のための装置の第6実施形態を示すブロック図である。この実施形態は、図7に示される実施形態と対比して、EDF12に光学的に接続される非線形光学媒質として希土類化合物がドーピングされていない光ファイバ54が付加的に設けられている点で特徴付けられる。具体的には、光ファイバ54は光アイソレータ30と光帯域通過フィルタ32との間に接続される。

【0072】光ファイバ54としては、変換光信号に対する損失が小さく且つ非線形相互作用長が長いファイバが適している。望ましくは、光ファイバ54は、位相整合条件を満たすために、変換光信号に $\pm 5 \text{ ps/nm/km}$ の範囲の波長分散を与える。

【0073】また、望ましくは、EDF12をそうしたのと同様の理由により、光ファイバ54は偏波保持ファイバにより提供される。この実施形態によると、EDF12において増幅された光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビームがWDMカブラ26及び光アイソレータ30をこの順に通過して光ファイバ54に供給されるので、EDF12内においてFWMが生じるだけでなく、光ファイバ54内においてもFWMが生じるので、光信号から変換光信号への変換効率を高めることができる。

【0074】この実施形態では、非線形光学媒質としての光ファイバ54を、WDMカブラ26及び光アイソレータ30を介してEDF12に光学的に接続している

が、EDF12と非線形光学媒質との間の損失を小さく抑えて変換効率を更に高めるために、非線形光学媒質をEDF12の第2端12Bに直接接続してもよい。

【0075】尚、ファイバ内における光パワー密度を高めて変換効率を高くするためには、EDF12及び光ファイバ54の各々は $6 \mu\text{m}$ 以下のモードフィールド径を有していることが望ましい。

【0076】以上説明した各実施形態において、EDF12内において効果的にFWMを発生させるためには、EDF12の長さを100m以上にすることが望ましい。図13は本発明による波長変換のための装置の第7実施形態を示す図である。この装置は、図8に示される実施形態では例えばファイバ接続により提供されている光アイソレータ14、EDF12、WDMカブラ26及び光アイソレータ30により得られる機能を得るためのユニットをハウジング56内にバルク型に提供している。

【0077】ハウジング56には光ファイバ58、60及び62が固定されている。光ファイバ58及び60間には、レンズ64、66、68及び70により光路OP1が形成されている。また、光ファイバ62についてはレンズ72により光路OP2が形成されている。光路OP1及びOP2は図8に示されるWDMカブラ26に対応するWDMカブラ74によって結合される。

【0078】WDMカブラ74は、例えば、透明基板76上に誘電体多層膜78を形成することによって得られる。レンズ64及び66間には図8に示される光アイソレータ14に対応する光アイソレータ80が設けられており、WDMカブラ74及びレンズ70間には図8に示される光アイソレータ30に対応する光アイソレータ82が設けられている。また、レンズ66及び68間には、図8に示されるEDF12に対応する波長変換素子84が設けられている。

【0079】波長変換素子84は、単独部品として提供可能であり、例えば次のようにして製造することができる。図14は図13に示される波長変換素子84の製造方法の説明図である。まず、ファイバグレーティングFGが成形されたEDF12'が提供される。ここでは、EDF12'はフッ化物ファイバにより提供されている。フッ化物ファイバにおいては、Er (エルビウム) 化合物のドーパントを高濃度にドーピングしたとしてもドーパントによる散乱が生じにくいので、EDF12'を短くすることができる。具体的には、EDF12'の長さを10cm以下に短くし且つ十分な変換効率を得るためには、ドーパント濃度を50,000ppm以上にすればよい。次いで、EDF12'はジルコニア、ガラス、ステンレス等からなるフェルール86の細孔86Aに挿入固定される。

【0080】その後、フェルール86の端面86B及び86Cは、EDF12'の軸に垂直な面に対して傾斜す

るように研磨される。そして、端面86B及び86Cの各々に誘電体多層膜等からなる反射防止膜が形成され、波長変換素子84が完成する。

【0081】再び図13を参照してこの装置の動作を説明する。波長 λ_1 (ω_1) の光信号と波長 λ_2 (ω_2) の第1のポンプ光ビームとが光ファイバ58から光アイソレータ80を通して波長変換素子84のEDF12' に供給される。また、図示しないポンプ光源からの波長 λ_p のポンピング光がWDMカプラ74を介してEDF12' に光信号及び第1のポンプ光ビームと逆向きに供給される。

【0082】EDF12' においては、これまでの実施形態におけるのと同じようにして波長 λ_3 (ω_3) の第2のポンプ光ビームが発生し、EDF12' 内におけるFWMにより変換光信号が発生する。

【0083】波長変換素子84からの光信号並びに第1及び第2のポンプ光ビーム並びに変換光信号は、WDMカプラ74及び光アイソレータ82を通して光ファイバ60に供給される。

【0084】この実施形態によっても、これまでの実施形態と同様の原理に従って光信号から変換光信号への変換効率の高い装置の提供が可能になる。特にこの実施形態では、波長変換素子84が単独の部品として提供されるので、装置の製造が容易である。

【0085】また、フェルール86の端面86B及び86CはEDF12' の軸に垂直な面に対して傾斜しているので、端面86B及び86Cにおける反射が防止され、波長変換素子84において不所望な発振が生じるおそれがない。

【0086】更に、一般にフッ化物ファイバは潮解性を有しているので、フェルール86及び前述した両端の反射防止膜の組み合わせは、密閉構造を提供してフッ化物ファイバの安定性を高める上で極めて有効である。

【0087】以上説明した実施形態では、各ファイバグレーティングのグレーティングピッチを変化させることにより、そのレーザ発振波長を変化させることができるので、第1のポンプ光ビームの波長及び／又は第2のポンプ光ビームの波長を変化させることができ、従って、光信号及び変換光信号間の離調波長を任意に設定し得るようになる。ファイバグレーティングのグレーティングピッチは、例えばペルチェ素子を用いてファイバグレーティングが形成されている光導波構造の温度を変化させることにより変化させることができる。

【0088】以上説明した実施形態では、希土類化合物がドープされた光導波構造としてEDFを例にとり本発明を説明したが、本発明はこれに限定されない。例えば、Nd、Yb等の他の希土類化合物がドープされたドープファイバを用いて本発明を実施することもできる。更には、光導波構造は光ファイバによって提供されることには限定されず、導波路基板上に形成された光導波路

に希土類化合物をドープしてもよい。

【0089】以上説明した実施形態の2つ又はそれよりも多くを組み合わせる本発明を実施してもよい。

【0090】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、変換効率の高い波長変換のための方法及び装置の提供が可能になるという効果が生じる。本発明の特定の実施形態による効果は以上説明した通りであるのでその説明を省略する。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1の(A)及び図1の(B)は波長変換のための方法(従来技術)の説明図である。

【図2】図2はEDF(エルビウムドープファイバ)におけるFWM(四光波混合)を確認した実験系を示すブロック図である。

【図3】図3は図2の実験においてFWMにより生じた光のスペクトルを示す図である。

【図4】図4は本発明による波長変換のための方法の第1実施形態の説明図である。

【図5】図5は本発明による波長変換のための方法の第2実施形態の説明図である。

【図6】図6は本発明による波長変換のための方法の第3実施形態の説明図である。

【図7】図7は本発明による波長変換のための装置の第1実施形態を示すブロック図である。

【図8】図8は本発明による波長変換のための装置の第2実施形態を示すブロック図である。

【図9】図9は本発明による波長変換のための装置の第3実施形態を示すブロック図である。

【図10】図10は本発明による波長変換のための装置の第4実施形態を示すブロック図である。

【図11】図11は本発明による波長変換のための装置の第5実施形態を示すブロック図である。

【図12】図12は本発明による波長変換のための装置の第6実施形態を示すブロック図である。

【図13】図13は本発明による波長変換のための装置の第7実施形態を示す図である。

【図14】図14は図13に示される波長変換素子の製造方法の説明図である。

【符号の説明】

12, 12' エルビウムドープファイバ(EDF)

14, 30, 80, 82 光アイソレータ

16 光マルチプレクサ

18, 20, 28, 52 レーザダイオード

22, 24, 26, 74 WDMカプラ

32 光帯域通過フィルタ

54 光ファイバ

84 波長変換素子

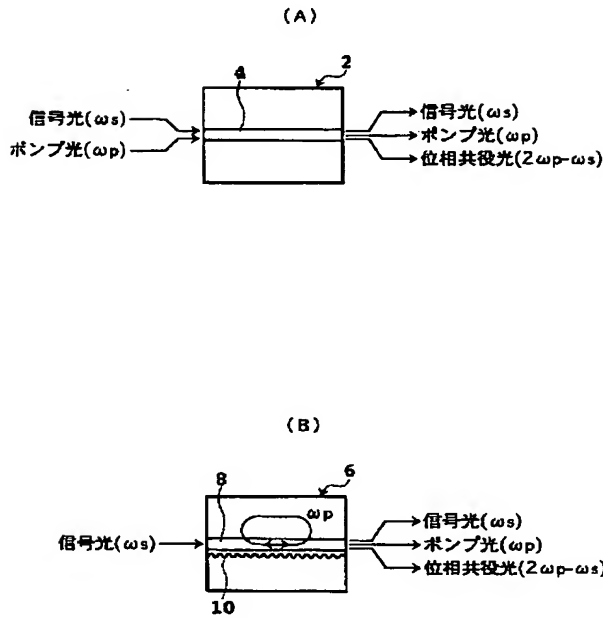
86 フェルール

FG, FG(#1), FG(#2) ファイバグレーテ

イング

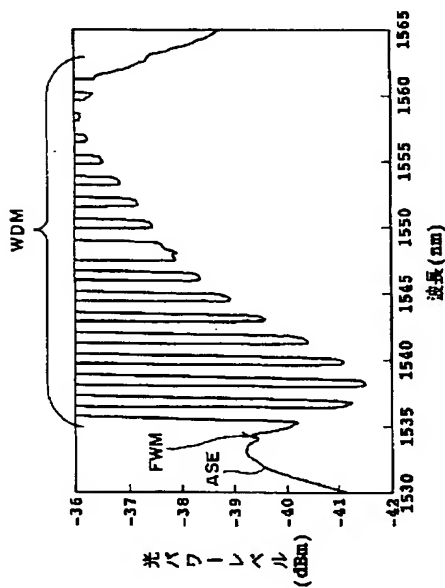
【図 1】

波長変換のための方法の説明図
(従来技術)



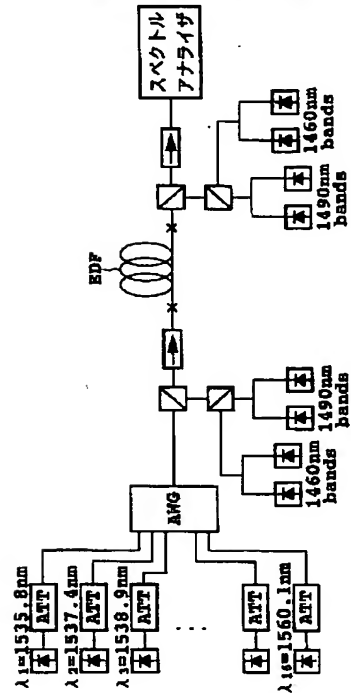
【図 3】

図 2 の実験において
FWM により生じた光のスペクトルを示す図



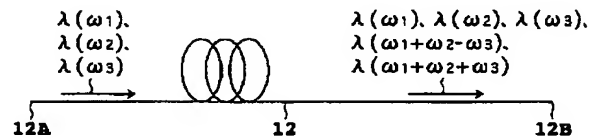
【図 2】

EDF における FWM を確認した
実験系を示すブロック図



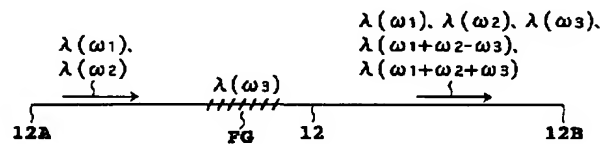
【図 4】

本発明による方法の第 1 実施形態の説明図



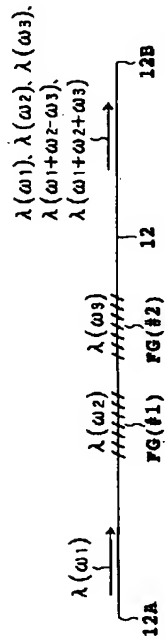
【図 5】

本発明による方法の第 2 実施形態の説明図



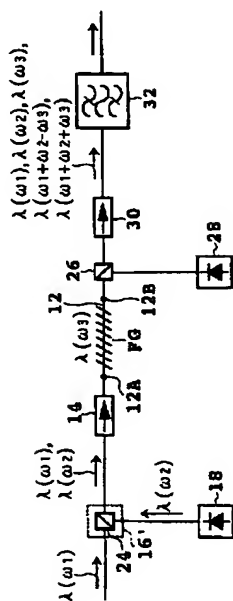
【図 6】

本発明による方法の第3実施形態の説明図



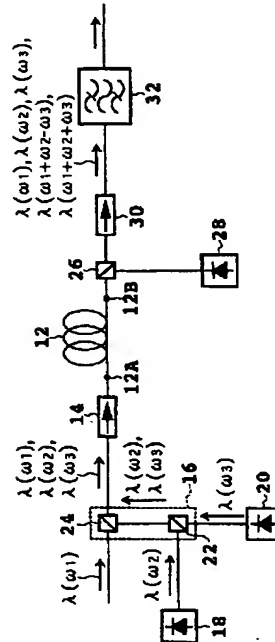
【図 8】

本発明による装置の第2実施形態を示すブロック図



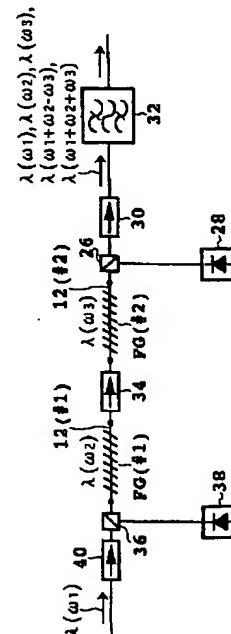
【図 7】

本発明による装置の第1実施形態を示すブロック図



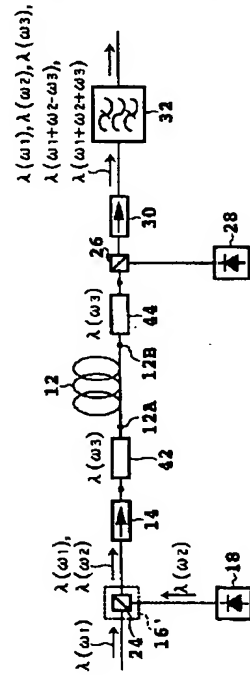
【図 9】

本発明による装置の第3実施形態を示すブロック図



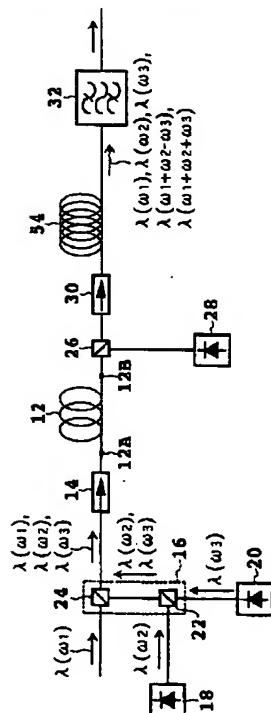
【図10】

本発明による装置の第4実施形態を示すブロック図



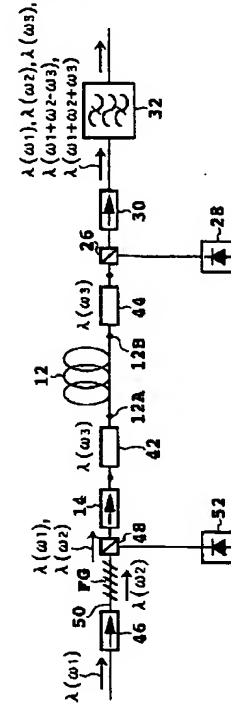
【図12】

本発明による装置の第6実施形態を示すブロック図



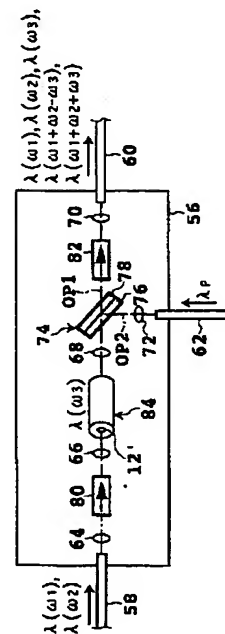
【図11】

本発明による装置の第5実施形態を示すブロック図



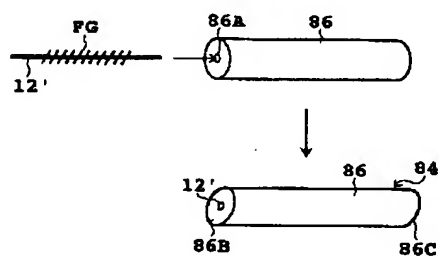
【図13】

本発明による装置の第7実施形態を示すブロック図



【図 1 4】

図 1 3 に示される波長変換素子の製造方法の説明図



フロントページの続き

(72) 発明者 橋 利雄
北海道札幌市中央区北一条西 2 丁目 1 番地
富士通北海道デジタル・テクノロジー株
式会社内

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB12 BA01 CA16 DA10
HA31